

## NAL 1 m × 1 m 超音速風洞変動圧計測結果

渡辺光則、鈴木教雄（航空宇宙技術研究所）、外立政隆（航空宇宙技術振興財団）  
西島寛典、伊藤正剛（IHI エアロスペースエンジニアリング）

## Measurements of Fluctuating Pressures in the NAL 1m×1m Supersonic Wind Tunnel

Mitsunori WATANABE, Norio SUZUKI (NAL), Masataka HASHIDATE (JAST),  
Hironori NISHIJIMA, Masatake ITOH (ISE)

## 概要

平成11年度から平成12年度にかけて、航技研吹出式1m×1m超音速風洞の改修が行われた。改修では、老朽化対策、気流特性／データ生産性の向上等を目的として、風洞主要部である高圧導管部、集合胴部、可変ノズル・測定部及び風洞運転制御システム全体等が更新された。本報告では、風洞改修後の気流特性における変動圧（総圧変動）について調べた結果を述べる。また風洞改修前後の総圧変動データの比較より、風洞改修の効果を示す。

## 1. はじめに

航技研吹出式1m×1m超音速風洞<sup>1)</sup>は、図1に示す2次元可変ノズルにより、設定マッハ数 $M_\infty$ を1.4から4.0の範囲内で変更可能な風洞である。本風洞においては、平成11年から平成12年にかけて、老朽化対策及び気流特性／データ生産性の向上等を目的とした約40年ぶりの大改修<sup>2)</sup>が行われた。主な更新部は、測定部より上流の高圧導管部、集合胴部、可変ノズル・測定部及び風洞運転制御システム全体等である。

気流特性試験は、風洞改修期間内の気流調整を含めてこれまでに各種実施されている。これまで実施された試験内容は、①測定部マッハ数一様性確認・調整試験、②AGARD-B標準模型を用いた気流偏向確認試験及び③変動圧（総圧変動）計測試験である。

本報告では、風洞改修後に実施された測定部総圧( $P_{02}$ )変動計測試験結果について述べる。また、表1の総圧変動計測経緯に示す風洞改修前後の総圧変動データの比較より、風洞改修の効果も示す。

## 2. 気流特性改善のための風洞改修事項

気流特性改善のための主な風洞改修事項は、①集合胴内への追加機能設置、②縮流部の流路形状改善及び③2次元可変ノズル形状設定精度向上等である。

## 2. 1 集合胴内への追加機能設置

図2に風洞改修後における集合胴部内の構成を示す。改修では、従来装備されていた4枚のスクリーン（SUS製金網）に加え、低騒音化を目的としてグラスウール製変形型消音スプリッタが、また整流能力向上を目的としてアルミ製ハニカムが追加設置された。

上記の追加機能設置のために集合胴の長さは、改修前よりも約5m延長された。なお、縮流比は改修前の12.6に対して、改修後は若干小さい11.7である。

## (1) グラスウール製変形型消音スプリッタ

消音スプリッタは、グラスウール表面全体がガラスクロス、金網及びパンチングメタルの順で覆われた構造である。グラスウールは密度

64kg/m<sup>3</sup> (JIS A6306) で、10%圧縮され封入されている。また、スプリッタ板の枚数は14枚で全スプリッタの整流部内径に対する断面積比（開口比）は、約50%である。本消音スプリッタは、航技研2次元風洞<sup>3)</sup>で使用されているものと同じタイプで、騒音に対しては2kHz付近の周波数領域で最も減衰効果<sup>4)</sup>がある。

(2)アルミ製ハニカム

ハニカムは、セルサイズ9.52mm×長さ185mmである。設置位置は第1スクリーンと第2スクリーン間である。

(3) SUS製スクリーン

スクリーンの枚数は風洞改修前と同数の4枚であるが、メッシュサイズ及び配置（改修前は4枚を連続に設置）が変更された。各スクリーン（金網）の主な仕様は、以下の通りである。

	第1スクリーン	第2～第4スクリーン
メッシュサイズ <sup>a)</sup>	#10	#20
線径	φ0.6mm	φ0.3mm
開口面積比 <sup>b)</sup>	0.5834	0.5834

2. 2. 縮流部

集合胴円形形状と可変ノズル矩形形状をつなぐ縮流部は、滑らかで剥離のない流れを2次元可変ノズルに導くために、新しい形状に変更された。主な変更点は、下記の①から③の通りである。

- ①縮流部全長に対する異形縮流部の長さ比を大きくした。
- ②円形縮流部上流側の曲率半径 (R1) 及び可変ノズル側壁との接合部曲率半径 (R2) を、可能な範囲で大きくした。
- ③縮流部と可変ノズル上下可撓壁との接続角度を15°とした。

以上のような変更の結果、縮流部の長さは2.4mから2.9mに伸長された。

2. 3 2次元可変ノズル形状設定精度向上

2次元可変ノズル形状設定精度は、デジタル制御の導入により、大幅に改善された。ノズルの形状設定精度に関する改善事項を、以下に示す。

- ①可変ノズル入口高さが2.2mから1.5mに変更され、縮流部からノズルへのつながりが改善された。
- ②ノズル形状設定精度は、変形量の最も大きい設定マッハ数M<sub>∞</sub>4.0において、ノズル曲線ゲージに対する曲線形状設定精度（スロート下流側）が±0.1mm以下、二次元性については±0.03mm以下である。
- ③上下可撓板形状設定の制御方式は、油圧ジャッキ制御方式からデジタルによる電動ジャッキ制御方式（電動ジャッキ数量：上下21対、ジャッキ軸型式：ローラーネジ）に変更された。本制御方式は、各ジャッキストロークの微調整を可能とし、ノズル形状修正を容易にした。ジャッキストロークの最小調整量及び調整範囲は、それぞれ0.01mm及び約±10mmである。なお、設定マッハ数M<sub>∞</sub>2.1から4.0の範囲では、基本的にノズル基本形状が微修正されている。

3. 計測

3. 1 模型

図3. 1に風洞改修後の総圧変動計測試験で使した模型の先端部（2種類）を示す。試験でのデータ取得は、基本的に外径φ24mmのタイプA型模型を使用して行った。本模型にはネジ込み固定方式の差圧型圧力センサーが取付けられている。強固に固定できる同固定方式の圧力センサーを選択した理由は、通風時のロード対策のためである。なお改修前の総圧変動計測試験で使した模型の先端外径寸法は、タイプA型模型と同じである。また先端径φ10mmのタイプB型模型は、模型先端径の違いによる影響を調べるためのものである。本模型には、接着剤等使用による埋め込み固定方式の差圧型圧

力センサーが取り付けられている。

図3. 2に示す基準圧取得模型は、総圧変動計測用差圧型圧力センサーの基準圧（総圧： $P_{o2}$ ）を取得するための模型である。模型先端には $P_{o2}$ 取得孔のほかに差圧型圧力センサーも取り付けられており、総圧変動計測も可能である。

### 3. 2 計測位置

総圧変動計測位置と差圧型圧力センサーの基準圧取得位置を図4. 1及び図4. 2に、またタイプA模型の取り付け状況写真と通風時における同模型のシュリーレン写真を図4. 3及び図4. 4にそれぞれ示す。

図4. 1に示すように総圧変動計測位置は、改修前では測定部中心（シュリーレン窓の中心 $X,Y,Z=0\text{mm}$ ）より後方へ64mm、改修後では測定部中心である。また図4. 2に示す基準圧取得模型の取り付け場所は測定部西側壁で、模型先端は測定部中心より下流へ620mmの位置である。

### 3. 3 計測装置

風洞改修前後で使用した総圧変動計測機器の性能表を表2に示す。

図5には風洞改修後における基本的な総圧変動計測の系統図を示す。測定部中心位置での総圧変動計測には、Kulite製差圧型圧力センサーXT-140-25D（タイプA模型）及びXCQ93-25（タイプB模型）を使用した。また増幅器にはTEAC製シグナルコンディショナSA-57を、FFTアナライザーにはRION製SA-74を測定レンジ0~50kHz、周波数分解能62.5Hzにセットして使用した。増幅器よりの出力は2系統のレコーダ、NEC三栄製オムニエースRA-1200及びSONY製PC-216Aで記録した。

図5に示す総圧変動計測用差圧型圧力センサーの基準圧には、同圧力センサーの感度を高める目的で、大気圧ではなく基準圧取得模型で取得した総圧（ $P_{o2}$ ）を使用した。この基準圧

としての $P_{o2}$ は、通風開始後気流が安定した後、直ちに電磁弁を閉じて封入したものである。

## 4. 計測結果

### 4. 1 測定部中心の総圧変動

#### (1) パワースペクトル密度

風洞改修前後の周波数特性すなわち総圧変動パワースペクトル密度（PSD）分布の比較を図6に示す。改修前後の双方においてPSDは、周波数が増加すると全体的に減少する傾向を示す。特に20~30kHz以上では急激に減衰する。

改修後のマッハ数 $M_\infty 1.4$ から4.0におけるPSDは、改修前に比べて全ての周波数域で減少を示した。減少の著しい周波数域は0.3~20kHzで、改修前に比べて1ケタ小さい。またマッハ数に対しては、全体的にマッハ数が小さい方がPSDの減少率は大きい。

改修後のPSD分布パターンにおいて、マッハ数 $M_\infty 1.4$ から3.0では、0.3~20kHzでの著しい減少により、0.1kHz付近がピークとなった。またマッハ数 $M_\infty 1.4$ から4.0の全てのマッハ数において、30kHz付近のピークが顕著となった。このPSDが急激に減衰する直前でのピーク発生現象は、航技研0.2m超音速風洞<sup>5)</sup>でも見られる。

#### (2) オーバオール値

図7に測定部中心位置で測定した総圧（ $P_{o2}$ ）変動のオーバオール値（総圧変動量）を示す。 $\Delta P_{rms}/P_{o2}$ は、総圧変動分の実効値と平均総圧の比である。オーバオール値は風洞改修前に比べて、マッハ数 $M_\infty 1.4$ から4.0の全てで減少した。その減少率はマッハ数が小さいほど大きく、マッハ数 $M_\infty 1.4$ 付近では約1/5の著しい減少を示した。

改修前後のマッハ数に対する傾向は、改修前は低マッハ数ほどオーバオール値は大きいが、改修後は全体的に高マッハ数の方がオーバオール値は大きい。また航技研0.2m超音速風洞<sup>5)</sup>と比較した場合、マッハ数 $M_\infty 2.0$ 以下では少し

大きい、マッハ数 $M_\infty 2.5$ ではほぼ同じである。

#### 4. 2 測定部中心より上下位置での総圧変動

タイプA模型を上下方向に平行移動して、中心より $h=\pm 150\text{mm}$ 及び $\pm 300\text{mm}$ の位置で総圧( $P_{o2}$ )変動を測定した。図8. 1に測定位置を、図8. 2から図8. 3に測定結果を周波数特性(パワースペクトル密度:PSD)で示す。マッハ数 $M_\infty 1.4$ では、 $h=\pm 150\text{mm}$ 及び $\pm 300\text{mm}$ のPSD分布は中心 $h=0\text{mm}$ のPSD分布と全体的にほぼ一致している。またマッハ数 $M_\infty 2.0$ では、中心 $h=0\text{mm}$ のPSDに対して、周波数域 $0.3\sim 2\text{kHz}$ で若干大きい、その他の周波数領域ではほぼ一致している。

#### 4. 3 計測レンジの相違による影響

総圧変動計測において、増幅器(TEAC製シグナルコンディショナSA-57)のレンジを切替えた場合の周波数特性(PSD分布)への影響を調べた。本総圧変動計測では、増幅器の設定は表3に示すように、Gain=1000及び励起電圧10[V]が最適である。これに対して、Gain=250及び励起電圧2.5[V]に変更し、圧力変換係数比を約16.2倍に上げて、すなわち感度を出来る限り下げて総圧変動計測実施した。図9は、マッハ数 $M_\infty 2.0$ 、タイプA模型及び測定位置 $X=0$ (測定部中心)の試験条件下での計測結果である。PSD分布は、圧力変換係数比を上げる前に対して、周波数域 $1.5\text{kHz}$ 以下及び $40\text{kHz}$ 以上で多少相違があるが、全体には概ね一致した。以上より、増幅器のレンジ切替えによる周波数特性への影響は、小さいことが分かった。

#### 4. 4 模型先端径、センサー型式の相違による影響

タイプB模型を使用して、測定部中心での総圧変動データを取得し、タイプA模型で取得したデータとの比較を行った。タイプA模型とタイプB模型の相違は、上記「3. 1 模型」で述

べたように先端径(タイプA:  $\phi 24\text{mm}$ /タイプB:  $\phi 10\text{mm}$ )とKulite製圧力センサー型式(タイプA: XT-140/タイプB: XCQ-93)の2点である。図10に示すように、マッハ数 $M_\infty 2.0$ における総圧変動データの周波数特性(PSD分布)は、タイプA及びB模型の双方ともほぼ同様である。以上の結果より、模型先端径、センサー型式の相違による周波数特性へ影響は、殆どないことが分かった。

#### 5. まとめ

平成11年度から平成12年度にかけて行われた航技研吹出式 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 超音速風洞改修完了後、気流特性を把握するために変動圧(総圧変動)計測試験を実施した。その結果、風洞改修により総圧( $P_{o2}$ )変動が著しく改善されていることが確認できた。

##### (1)測定部中心での総圧変動

①マッハ数 $M_\infty 1.4$ から $4.0$ において、総圧( $P_{o2}$ )変動を総圧変動パワースペクトル密度(PSD)分布で改修前と比較した結果、全周波数帯域( $0.06\sim 50\text{kHz}$ )で減少が確認された。特に周波数 $0.3\sim 20\text{kHz}$ で、改修前に比べて1ケタ小さい。

②マッハ数 $M_\infty 1.4$ から $4.0$ において、総圧変動をオーバーオール値で改修前と比較した。その結果、全てのマッハ数 $M_\infty$ でオーバーオール値の減少が確認された。全体的にマッハ数が小さいほど減少率が大きく、最大で約 $1/5$ である。

##### (2)測定部中心より上下位置での総圧変動

マッハ数 $M_\infty 1.4$ 及び $2.0$ において、測定部中心より上下 $h=\pm 150\text{mm}$ 及び $\pm 300\text{mm}$ のPSD分布は、測定部中心のPSD分布にほぼ一致または近い分布を示した。

## 6. 参考文献

- 1) 空気力学第二部：「1m×1m 吹出式超音速風洞の計画と構造」、NAL TR-29, 1962
- 2) 渡辺光則、楯篤志、浜本滋、酒井健二：「1m×1m 超音速風洞改修後の風洞性能と運転方式について」、NAL SP-51, 2001, PP.85-101
- 3) 榊原盛三、三輪等、小国保男、佐藤守、神田宏：「航技研二次元風洞の気流特性について（Ⅱ）」NAL TR-386, 1984
- 4) 「騒音・振動対策ハンドブック」、社団法人日本音響材料協会編、1982年1月
- 5) 澤田秀夫、河野敬、国益徹也：「0.2m 超音速風洞の圧力変動計測結果」、NAL TM-1355, 1998

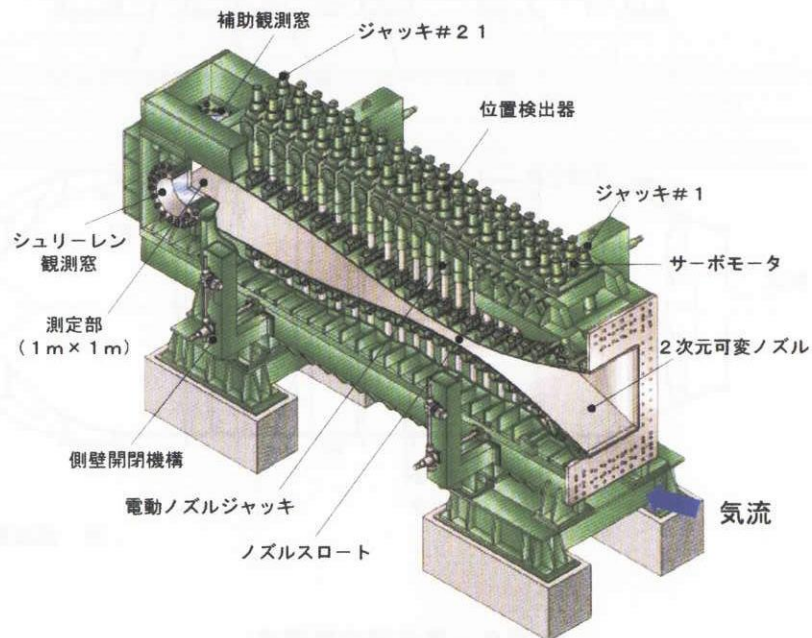


図1 2次元可変ノズル・測定部

年度	試験内容	マッハ数	Po2計測位置		備考
			測定部中心	測定部西壁側 (観測窓下流)	
H11/2	改修前	$M_{\infty}$ 1.5~4.0 (0.5間隔)	X=64mm Y=0mm Z=0mm		X, Y, Z (h) : 測定部中心からの距離 X(+): 下流側 X(-): 上流側 Y(+): 右方 (西側) Y(-): 左方 (東側) Z(+): 上方 Z(-): 下方
H11~H12					改修工事 工事範囲: 仕切弁下流から測定部までを更新
H13	予備試験	$M_{\infty}$ 1.4~3.0		X=620mm Y=380mm Z=0mm	計測方法確認ために実施
H14/3	改修後 ・レンジ大での試験 ・センサー型式/ビト管 模型先端径を変更	$M_{\infty}$ 1.4, 2.0~ $M_{\infty}$ 4.0 ( $M_{\infty}$ 2.0以上では 0.5間隔) ・ $M_{\infty}$ 2.0 ・ $M_{\infty}$ 2.0	X=0mm Y=0mm Z=0mm	X=620mm Y=380mm Z=0mm	感度係数大/小での比較 レンジ大: 感度係数小 模型先端径を $\phi 24\text{mm} \rightarrow \phi 10\text{mm}$ センサーのレンジは同じ
H14/4					シュリーレン観測窓ガラスの段差を修理

表1 変動圧 (総圧変動: Po2) 計測の経緯



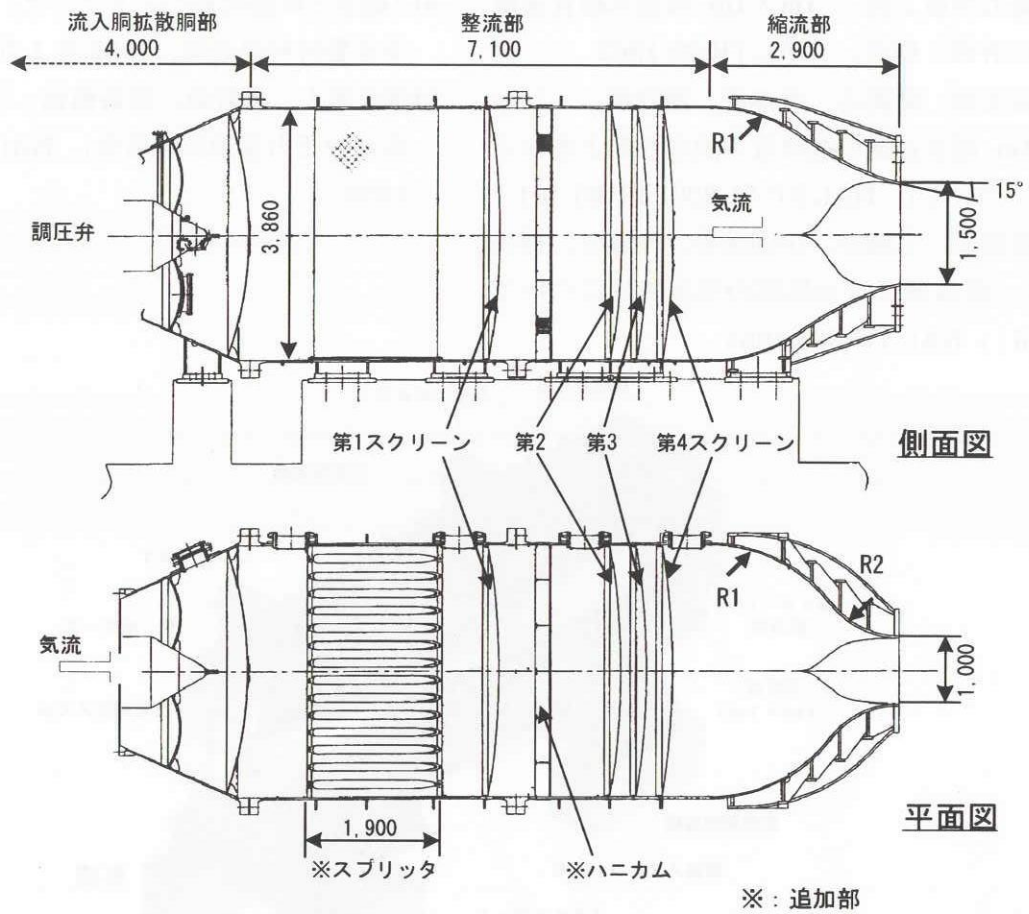


図2 集合胴内部構成

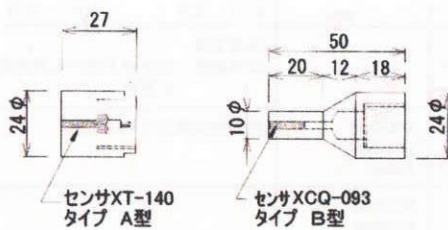


図3. 1 総圧変動計測模型

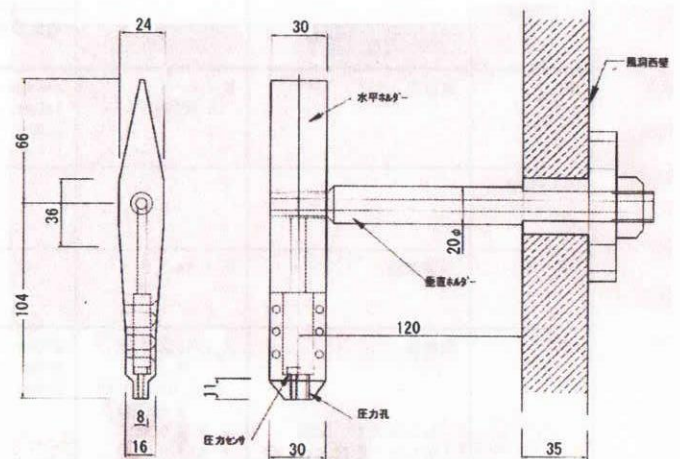


図3. 2 基準圧取得模型

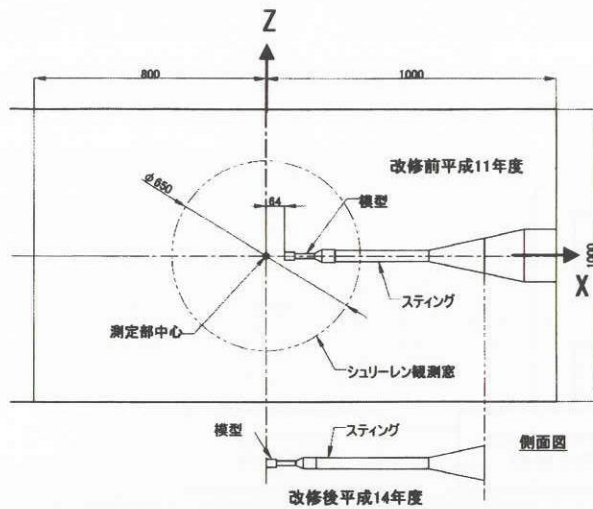


図4. 1 総圧変動測定位置

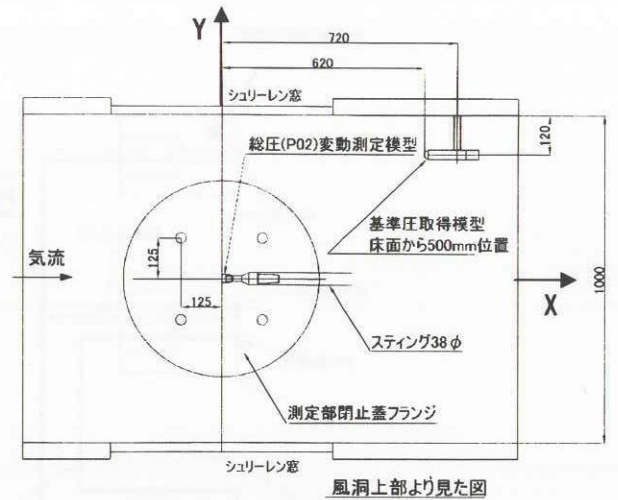


図4. 2 基準圧取得位置

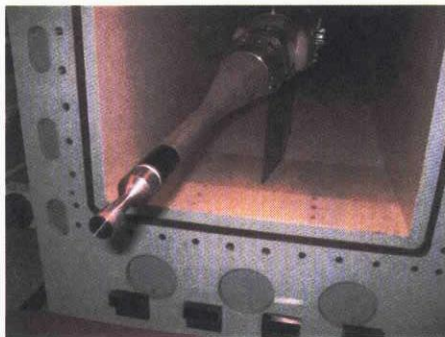
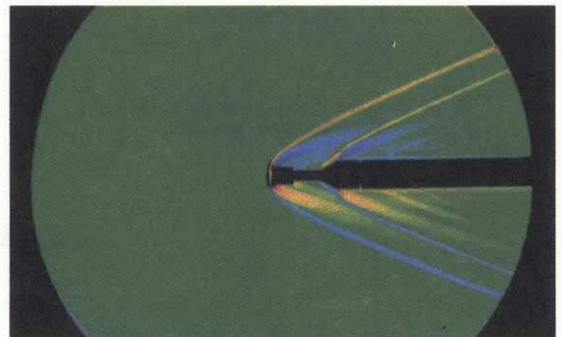


図4. 3 タイプA模型写真

図4. 4 タイプA模型シュリーレン写真  
(改修後、 $M_{\infty}=2.0$ )

機材名	型名	主な性能
センサ	KULITE XT-140-50D	入力レンジ 50psi 共振周波数 400kHz 非直線性 $\pm 0.1\%/FS$ 繰り返し精度 $\pm 0.1\%/FS$
シグナルコン デショナ	NEC三栄 AH11-10	励起電圧 2.5, 5, 10, 15, 20 v 周波数 DC~200kHz ゲイン 0.5k, 1.0k, 2.5k 非直線性 $\pm 0.05\%$
FFT アナライザ	RION-SA74	入力数 2ch 周波数レンジ 1 ~ 100kHz サンプリング点数 1024, 2048 A/D分解能 16bit ダイミックスレンジ -85db
デジタルデータ レコーダ	TEAC RD-135T	周波数帯 dc~20kHz (2倍) 歪み率 0.02% DC直線性 $\pm 0.1\%$ A/D分解能 16bit ダイミックスレンジ -80db以上

《改修前に使用した計測機器》

機材名	型名	主な性能
センサ	KULITE XT-140-50D XT-140-25D XCQ93-25	入力レンジ 25psi, 50psi 共振周波数 400, 300kHz 非直線性 $\pm 0.1\%/FS$ 繰り返し精度 $\pm 0.1\%/FS$
シグナル コンデショナ	TEAC SA-57	励起電圧 2.5, 5, 10, 15, 20 v 周波数 DC~200kHz ゲイン 0.25k, 0.5k, 1.0k, 2.5k, 5.0k 非直線性 $\pm 0.05\%$
FFT アナライザ	RION-SA74 ADVANTEST -R9112A/E	入力 2ch 周波数レンジ 1 ~ 100kHz サンプリング点数 1024, 2048 A/D変換器分解能 16bit ダイミックスレンジ -85db
デジタル グラフィック レコーダ	NEC三栄 RA-1200 オムニス	入力 2ch 周波数帯 dc~50kHz 直線性 $\pm 0.1\%$ A/D変換器分解能 16bit
デジタル データ レコーダ	SONY PC-216A	周波数帯 dc~20kHz (2倍速) 歪み率 0.02% DC直線性 $\pm 0.1\%$ A/D変換器分解能 16bit ダイミックスレンジ -80db以上

《改修後に使用した計測機器》

表2 計測機器性能表



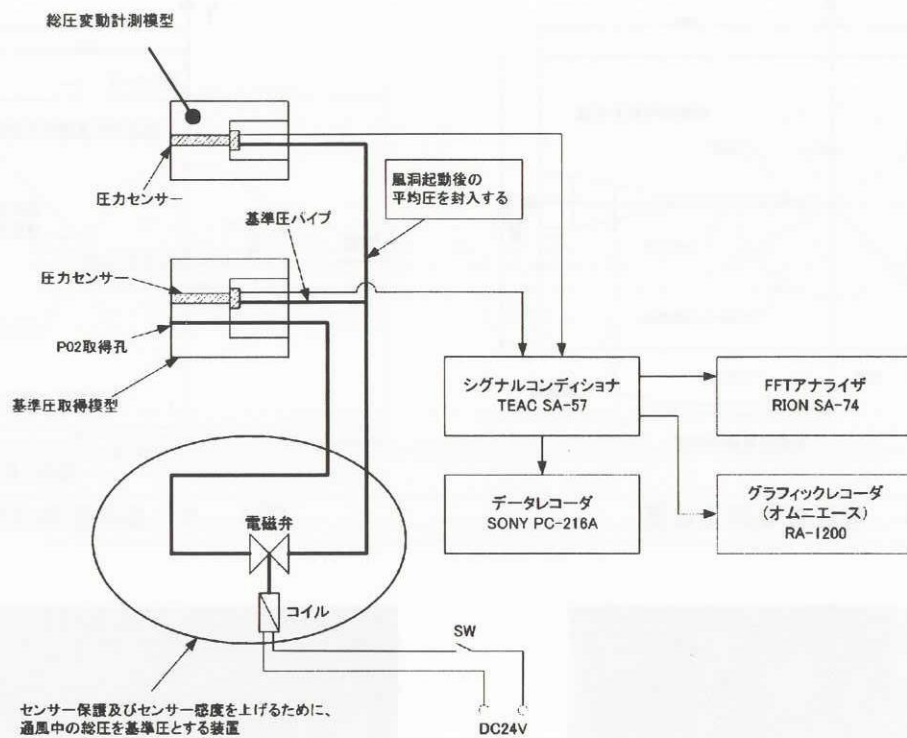


図5 計測系統図

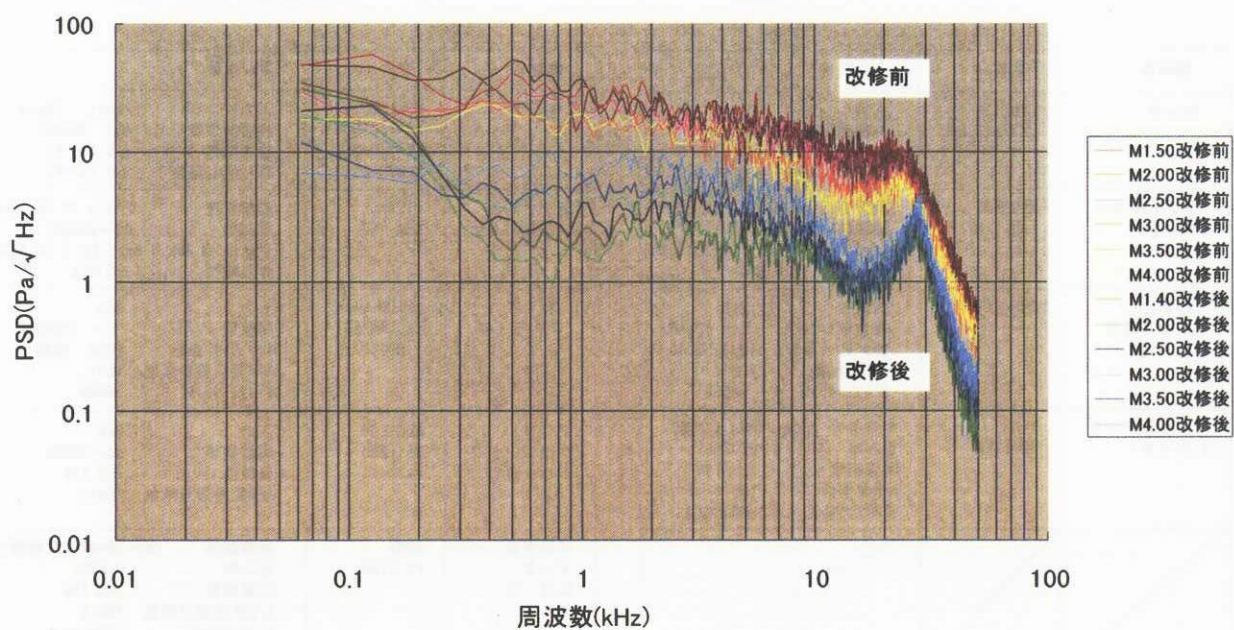


図6 改修前後の総圧変動パワースペクトル密度分布



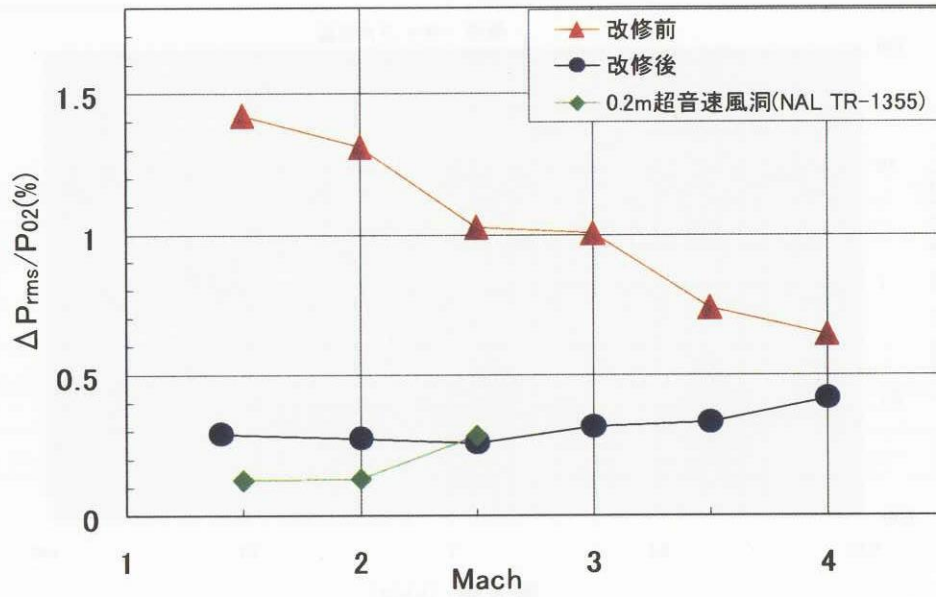
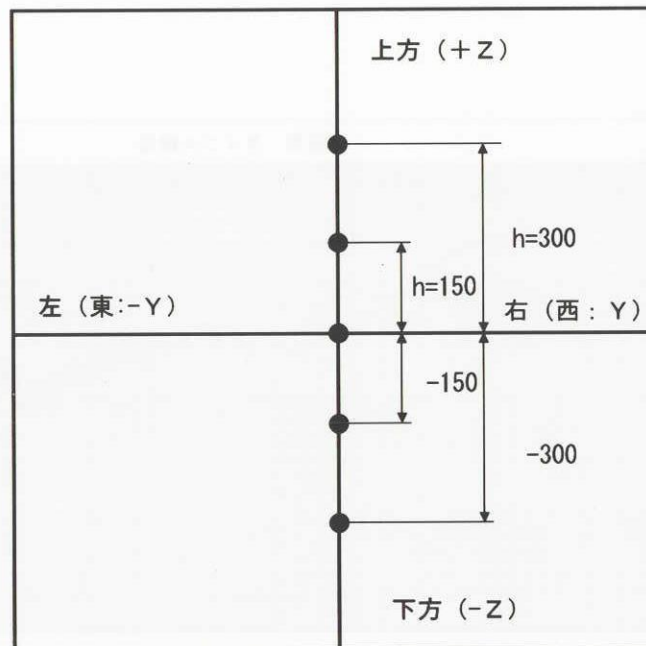
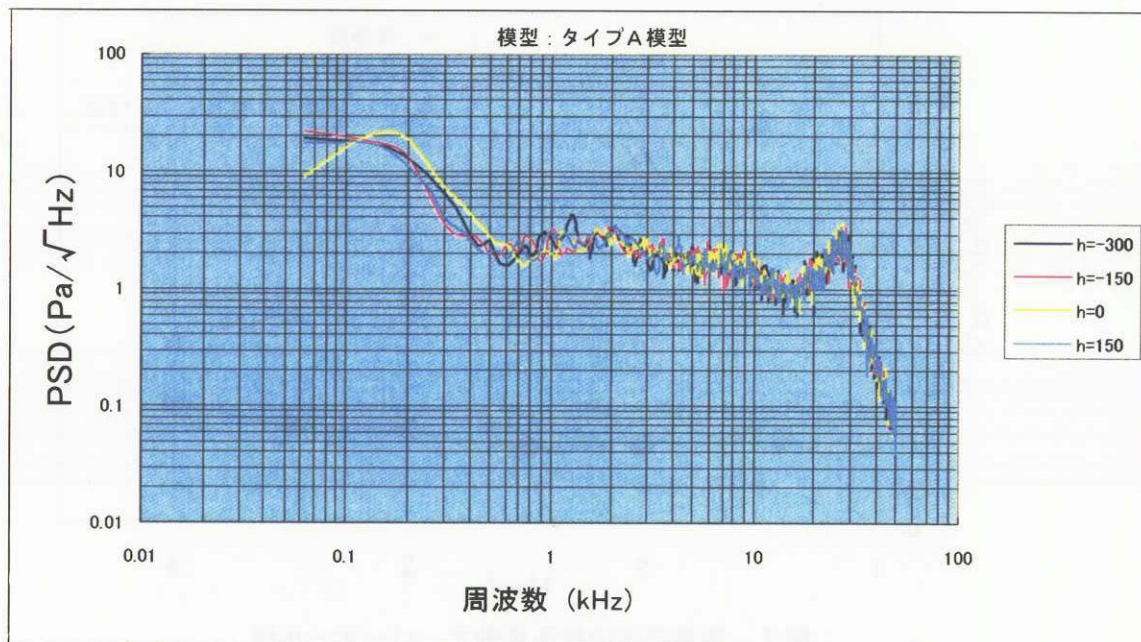
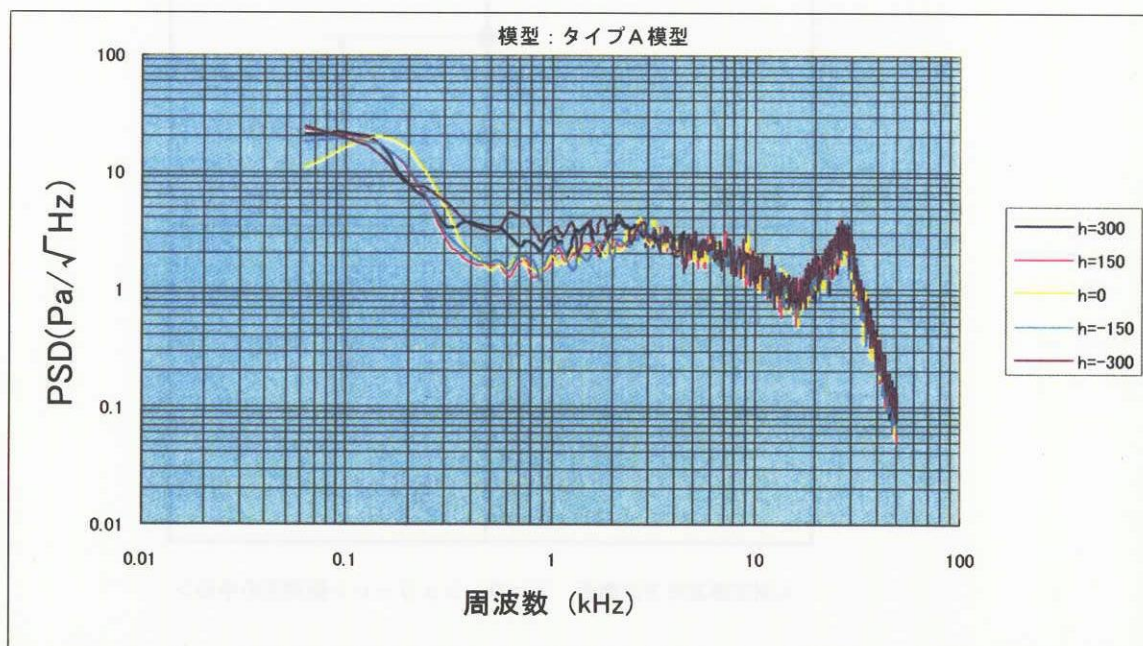


図7 改修前後の総圧変動オーバーオール値



<測定部左右方向断面  $X=0$  : シュリーレン観測窓の中心>

図8. 1 測定部中心上下方向測定位置

図 8. 2 測定部中心上下方向の総圧変動 ( $M_\infty=1.4$ 、 $X=0$ )図 8. 3 測定部中心上下方向の総圧変動 ( $M_\infty=2.0$ 、 $X=0$ )



機器名	レンジ小 (感度大)	レンジ大 (感度小)
・ センサー型式	XT-40-25D	XT-40-25D
・ シグナルコンディショナ TEAC-57	Gain=1000 励起電圧=10v 変換係数=1.5677kpa/v	Gain=250 励起電圧= 2.5v 変換係数=25.453kpa/v
・ FFT条件	周波数分解能62.5H 平均回数10回	周波数分解能62.5Hz 平均回数10回
・ レンジ比	1	16.2

表3 計測レンジ設定表

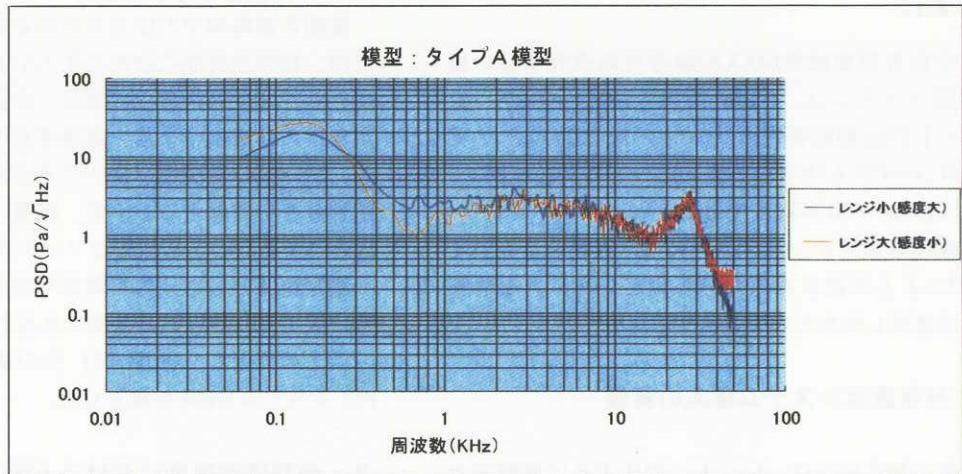


図9 計測レンジの相違による影響

( $M_\infty=2.0$ 、測定位置：測定部中心 X, Y, Z=0)

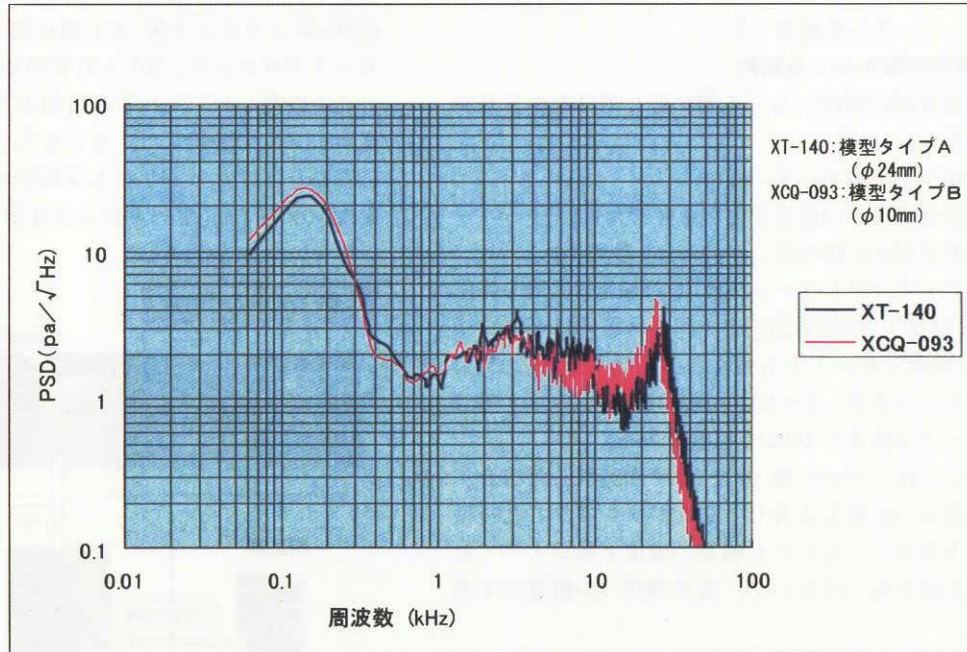


図10 模型先端径、圧力センサー型式の相違による影響

( $M_\infty=2.0$ 、測定位置：測定部中心 X, Y, Z=0)